

ESTUDIO DE LA IDONEIDAD DEL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO PARA LA CARACTERIZACION MECANICA DE LOS ACEROS Y DE SUS UNIONES SOLDADAS

C. RODRÍGUEZ C.

Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (universidad de Oviedo), campus universitario, 33203 Gijón, España. belzunce@uniovi.es

F.J. BELZUNCE

Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (universidad de Oviedo), campus universitario, 33203 Gijón, España. belzunce@uniovi.es

RESUMEN: Los ensayos small punch (SPT) permiten estimar propiedades mecánicas de los aceros, empleando una cantidad de material muy pequeña, lo que los hace especialmente interesantes en el análisis de componentes en servicio o zonas demasiado pequeñas para extraer probetas normalizadas. Existen diversas propuestas para estimar propiedades tales como el límite elástico, la resistencia a la tracción, el alargamiento a rotura o la tenacidad a fractura, si bien es cierto que existe una gran controversia sobre las mismas. El presente trabajo analiza varias de estas propuestas, aplicándolas a una amplia gama de aceros, con diferentes microestructuras y características mecánicas.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de analizar las propiedades mecánicas de componentes en servicio en la industria nuclear fue el motivo que impulsó el desarrollo de los ensayos miniatura de punzonado (small punch test, SPT) a principios de los años 80 [1]. Dichos ensayos permitían estimar el deterioro de los aceros empleados en vasijas nucleares como consecuencia de la irradiación neutrónica continuada, mediante la extracción y el ensayo de probetas suficientemente pequeñas como para no alterar su funcionamiento en servicio (ensayo casi no destructivo). Posteriormente, se fueron ampliando las aplicaciones de este ensayo al análisis de otros componentes (p.e tuberías), de zonas de elementos estructurales demasiado pequeñas como para extraer probetas normalizadas (p.e la ZAT de uniones soldadas o recubrimientos finos [2]), o para el análisis del comportamiento de los materiales en diferentes direcciones [3] o bajo diferentes tratamientos. También se ha extendido el SPT a otros materiales, como polímeros o biomateriales [4]. La evolución de la metodología ha permitido realizar estos ensayos miniatura tanto a altas como a bajas temperaturas [5,6] o incluso en contacto con medios corrosivos [7]. Más allá de poder establecer comparativas o “rankings” entre diferentes materiales, el principal objetivo del ensayo desde sus inicios ha sido la obtención de correlaciones capaces de estimar fidedignamente propiedades mecánicas que se obtienen en ensayos normalizados, tales como el límite elástico, la resistencia a la tracción, el alargamiento a rotura a tracción, la temperatura de transición dúctil-frágil, o la tenacidad a la fractura [8-12], existiendo todavía cierta

controversia entre las propuestas de unos y otros autores.

Centrándonos en los aceros, y en los ensayos a temperatura ambiente, la experiencia acumulada por diferentes líneas de investigación quedó plasmada en el año 2006 con la publicación de un “código de buenas prácticas” [13], que describe la metodología de ensayo considerada como más apropiada, así como las correlaciones más fiables para estimar las propiedades mecánicas a partir de los resultados obtenidos en el ensayo SPT. No obstante, los múltiples trabajos aparecidos desde esa época apuntan nuevas propuestas que parece necesario evaluar [2,3,9,14].

En base a todo lo expuesto, este trabajo presenta un análisis completo de las distintas propuestas existentes, aplicadas a un amplio rango de aceros cuyo comportamiento mecánico ha sido evaluado mediante ensayos convencionales, así como a través del ensayo miniatura de punzonado y, además, se ha aplicado la metodología descrita para analizar la zona afectada térmicamente tras el soldeo de un acero determinado.

2. ANTECEDENTES

La probeta más habitual utilizada en los ensayos miniatura de punzonado tiene una sección de 10x10 mm y 0.5 mm de espesor, al tiempo que la Figura 1 recoge, de modo esquemático, el dispositivo utilizado para la ejecución de este ensayo. El contorno de la probeta se empotra firmemente entre dos matrices de sujeción y en su región central se aplica un punzón de

cabeza semiesférica, que la deforma en el interior de una cavidad de diámetro predefinido hasta su rotura. La medida del desplazamiento del punzón se realiza mediante el uso de un extensómetro colocado en la parte externa del utillaje, mientras que la fuerza aplicada se lee con una célula de carga apropiada.

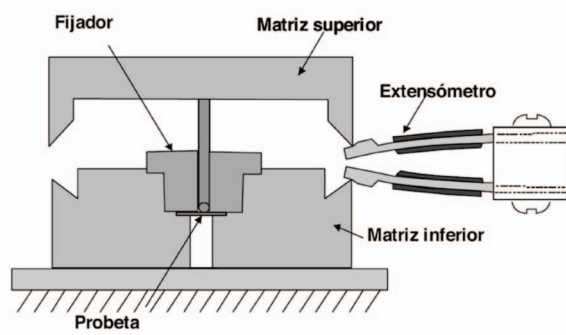


Figura 1. Configuración del ensayo small punch

La Figura 2 muestra el registro carga-desplazamiento típico que se obtiene en el ensayo de una aleación metálica dúctil, sobre el que se indican además sus diferentes regiones características. En la zona I, al comienzo del ensayo, el material sufre una deformación predominantemente elástica, acompañada por la indentación producida por la cabeza del punzón, al tiempo que el desplazamiento registrado aparece también un componente debido al acomodo de los componentes del utillaje. La zona II corresponde a la progresión de la deformación plástica, que pasa a ser generalizada extendiéndose a toda la probeta en la zona III, donde esta ya se comporta como una membrana.

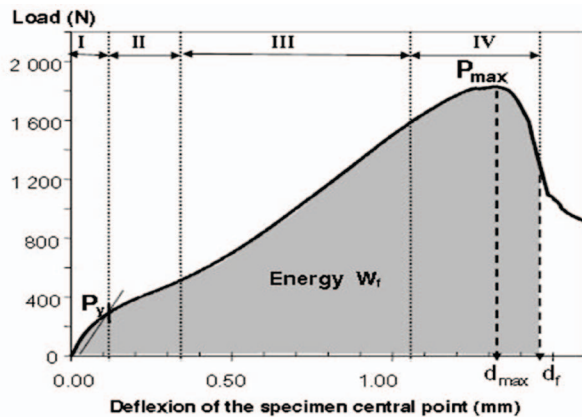


Figura 2. Curva característica del ensayo small punch

Al acercarnos a la carga máxima, la pendiente de la curva fuerza-desplazamiento disminuye debido al inicio de los distintos fenómenos que terminan

desencadenando la rotura (estricción y agrietamiento interno). Finalmente, en la zona IV, la región adelgazada alcanza el espesor completo de la probeta, provocando su rotura, que tiene lugar a lo largo de la región circular donde el punzón deja de estar en contacto con la probeta.

Aunque existen otros factores, sin duda el espesor de la probeta es el que más influye en los valores de carga y desplazamiento del ensayo SPT. Existen diversas propuestas para eliminar dicho efecto, entre las que destaca la de Lacalle et al. [3], recogida a través de las expresiones (1), que propone la obtención de una carga equivalente a la que presentaría la probeta con un espesor de 0.5mm ($P_{0.5}$) a partir de la carga registrada en el ensayo (P_{ens}) de una probeta de espesor t cualquiera.

$$P_{0.5} = 0.5^2 \frac{P_{ens}}{t^2} \quad P_{ens} < P_{INF} \quad (1)$$

$$P_{0.5} = 0.5 \frac{P_{ens}}{t} + \frac{0.5P_{INF}(0.5 - t)}{t^2} \quad P_{ens} \geq P_{INF}$$

Esta propuesta normaliza los valores de carga del ensayo, P_{ens} a través de dos expresiones diferentes en función de que la carga se encuentre por debajo o por encima de la correspondiente al punto de inflexión típico de las curvas SPT, que separa las zonas II y III de la curva (P_{INF}). De este modo, resulta posible comparar los resultados obtenidos en el ensayo SPT cuando se utilizan probetas de diferente espesor.

Uno de los aspectos más interesantes del ensayo, y en el que sin duda existe un acuerdo entre todos los investigadores, es en la relación existente entre el límite elástico del material y la carga que limita las zonas I y II del ensayo, P_y , dividida por el espesor inicial de la probeta al cuadrado (t^2), relación que se plasma mediante expresiones del tipo:

$$\sigma_y = \alpha \frac{P_y}{t^2} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \alpha_1 \frac{P_y}{t^2} + \alpha_2 \quad (3)$$

Donde existe una mayor controversia es en el modo de obtener la carga P_y . Uno de los métodos más utilizados ha

sido el propuesto por Mao y Takahashi [8], consistente en tomar como valor de P_y el correspondiente al cruce de las tangentes al tramo elástico (zona I) y a la zona de deformación plástica (zona II) (P_{y_ct}). La propuesta del “código de buenas prácticas” [13] se basa en una modificación de la anterior, calculando P_y como la proyección vertical del punto de corte de las tangentes sobre la curva de ensayo (P_{y_CEN}). Otros autores [2, 14, 15], proponen calcular P_y como el punto de corte de la curva con una recta paralela a la zona elástica desplazada un cierto valor, que generalmente se toma como 1/10 o 1/100 veces el espesor inicial de la probeta ($P_{y_t/10}$ y $P_{y_t/100}$ respectivamente). La propuesta más reciente ha sido realizada por Lacalle et al. [9], consistente en tomar como valor de P_y el correspondiente a un punto de inflexión localizado en la zona I (P_{y_inf}), que teóricamente separaría la región de indentación inicial que existe en la región de contacto entre el punzón y la probeta con la extensión de la deformación plástica en todo el espesor de la probeta.

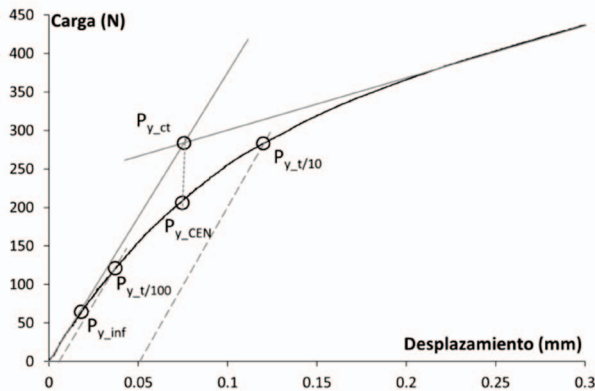


Figura 3. Diferentes propuestas para la obtención de P_y

Otro punto de controversia es la relación entre la resistencia a la tracción del material y la carga máxima del ensayo (P_m). Las propuestas más utilizadas son del tipo:

$$\sigma_u = \beta \frac{P_m}{t^2} \quad (4)$$

$$\sigma_u = \beta_1 \frac{P_m}{t^2} + \beta_2 \quad (5)$$

En este caso existe una gran variabilidad entre los valores de β , β_1 y β_2 obtenidos por unos y otros autores.

Además, la zona de la curva donde se produce la carga máxima podría depender de t y no de t^2 , como se ha visto en la expresión (1), por lo que también parece interesante evaluar la relación existente entre la resistencia a la tracción y P_m/t .

Por su parte, la expresión más aceptada para estimar el alargamiento a la tracción (A) es la que lo relaciona con el desplazamiento correspondiente a la carga máxima de ensayo SPT (d_m):

$$A(\%) = \gamma_1 \frac{d_m}{t} + \gamma_2 \quad (6)$$

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este trabajo se han utilizado 15 aceros distintos, con microestructuras muy diferentes, cuyas propiedades finales han sido obtenidas en tratamientos realizados en la propia línea de producción, tras tratamientos de temple y revenido y también tras el soldeo de algunos de ellos. De este modo se han empleado chapas de acero para automóvil (aceros DP 1, 2, 3 y 4), aceros estructurales de diferente resistencia mecánica (S460, S460ZAT, API X70, AR y AR_ZAT), aceros resistentes a la fluencia para usos a temperaturas comprendidas entre 400 y 550°C (Asturfer y CrMoV 1, 2, 3 y 4) y, por último, aceros inoxidables (AISI 304 y D2205). En el caso de los aceros CrMoV, además de la chapa tratada térmicamente (CrMoV 1), se ha utilizado el metal depositado en estado bruto de soldeo (CrMoV 2) y este mismo metal tras un tratamiento térmico intermedio (CrMoV 3) y tras el tratamiento térmico postsoldo convencional (CrMoV 4). Por otro lado el sufijo ZAT que se indica tras las calidades S460 y AR significa que se trata de la región afectada térmicamente en el soldeo de estos productos. La Tabla 1 da cuenta de las propiedades mecánicas objeto de análisis de todas estas calidades, así como de las fases mayoritarias presentes en su microestructura. Nótese que, además de utilizar una gran variedad de microestructuras diferentes, también las propiedades mecánicas de todos estos aceros varían de modo muy significativo (límite elástico comprendido entre 408 y 1240 MPa, junto a alargamientos a rotura entre el 10 y el 56%).

Tabla 1. Propiedades mecánicas y fases mayoritarias de los aceros analizados

Acero	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	A (%)	Microestructura
DP 1	460	825 *	20	ferrita + martensita
DP 2	500	854 *	-	
DP 3	632	870 *	15	
DP 4	622	990 *	14	
S460	475	660	28	ferrita+ perlita
API X70	555	658	24	
S460ZAT	700	1100	22	martensita revenida
AR	1245	1380	11.5	
AR_ZAT	1050	1150	-	
Asturfer	600	756	18	martensita revenida
CrMoV 1	600	700	20	
CrMoV 2	1020	1120	17	bainita reve- nida
CrMoV 3	745	808	18.5	
CrMoV 4	533	631	22.7	
AISI 304	408	720	56	austenita
D2205	570	810	36	austenita + ferrita

* Valores de referencia suministrados por el fabricante

Tabla 2. Composición química del acero base (% en peso)

Acero	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	A (%)	Microestructura
30CrMo5-2	900	1000	15	bainita/martensita revenida

Los cupones soldados se realizaron mediante soldadura a tope, realizada por ambos lados, utilizando la técnica de pasadas múltiples y con un diseño de junta en doble U. El proceso de soldeo utilizado fue SMAW, con electrodos de 4 mm de diámetro.

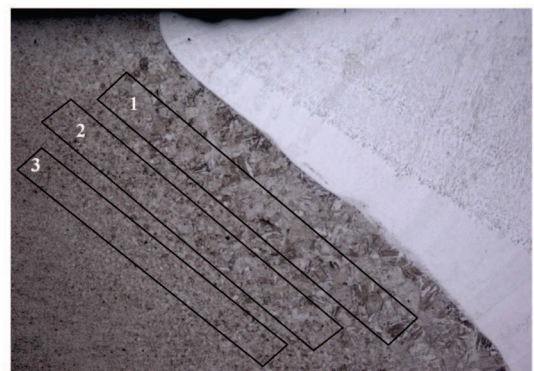
Localizadas las distintas zonas de la ZAT aplicando el correspondiente ataque metalográfico, y con objeto de mecanizar las probetas para el ensayo SPT, se procedió a extraer mediante electroerosión tres tiras longitudinales de 0.5mm de espesor, partiendo desde la línea de fusión, que, cortadas de manera consecutiva, barrían las diferentes subzonas de la ZAT. Estas tiras se numeraron consecutivamente de 1 a 3, siendo la 1 la más próxima a la línea de fusión. A partir de esas tiras se cortaron probetas SPT con una sección de 10x10 mm². En la Figura 4 se muestra la zona térmicamente

Los ensayos SPT fueron realizados en una máquina universal de ensayos estáticos INSTRON, a una velocidad de 0.2 mm/min con un utillaje especialmente diseñado a tal efecto. El diámetro del punzón fue de 2.4 mm, y el del hueco en la matriz inferior de 4 mm, con un radio de acuerdo de 0.2 mm. El espesor de todas las probetas tuvo siempre un valor muy próximo al nominal de 0.5 mm y fue cuidadosamente obtenido como media de 5 valores medidos mediante un micrómetro de precisión. Se utilizó un número mínimo de 6 probetas en la caracterización de cada material.

Al objeto de evitar cualquier tipo de subjetividad en el análisis de las curvas, se implementó una rutina en MATLAB que ajustara la curva a un polinomio de grado 12, cuya derivada segunda permitió obtener de forma precisa los puntos de inflexión (P_{INF} y P_{y_inf}).

Finalmente, utilizando las correlaciones encontradas en la fase experimental que se acaba de describir, se ha procedido a estudiar la zona afectada térmicamente (ZAT) de una soldadura en la que se utilizó como material base (MB) una chapa de acero 30CrMo5-2, templado y revenido a 500-550°C, de 25mm de espesor y como material de aporte (WM) un acero inoxidable austenítico tipo EN 1600 E 18 8 Mn B22 [16]. La microestructura y propiedades mecánicas a tracción del metal base se expone en la Tabla 2

afectada, que alcanzó un ancho aproximado de 4.5 mm y, también, la secuencia de extracción de las tiras constitutivas de la ZAT. Se ensayaron un mínimo de tres probetas de cada una de las subzonas.

**Figura 4.** Microestructura de las diferentes zonas de la ZAT y situación de las tiras extraídas mediante electroerosión

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Estudio de la adecuación de las expresiones referenciadas para la determinación de las propiedades mecánicas convencionales en el ensayo SPT

La Tabla 3 muestra los coeficientes de variación correspondientes a los diferentes valores de P_y , que se han calculado tal y como se había expuesto en el apartado de Antecedentes, con el objetivo de analizar cuál es el que muestra la menor dispersión de resultados. Como puede observarse, los mejores resultados se han obtenido al utilizar el parámetro $P_{y,t/10}$ con un coeficiente de variación medio de 0.06, seguido de $P_{y,ct}$ y $P_{y,CEN}$ con coeficientes de variación de 0.07 y 0.08 respectivamente. Por otro lado, se considera más ventajoso el primer sistema de cálculo, ya que además de presentar la variabilidad más baja, sólo requiere trazar una tangente para su cálculo, frente a $P_{y,ct}$ y $P_{y,CEN}$ que requieren trazar otra tangente a la curva en la zona II, lo que añade un posible motivo de error o subjetividad en el análisis. $P_{y,t/100}$ y $P_{y,inf}$ muestran una variabilidad apreciablemente mayor debido a que se calculan en zonas de la curva donde la variación de la pendiente es más pronunciada, por lo que pequeñas variaciones en el desplazamiento suponen grandes variaciones en la carga. Además, la alta dispersión obtenida con $P_{y,inf}$ parece indicar que este valor de carga estaría muy influenciado por el tipo de utillaje utilizado.

La Figura 5 muestra la correlación entre $P_{y,t/10}$ dividido por el cuadrado del espesor de la probeta, y el límite elástico de los distintos materiales evaluados, agrupados en función de su microestructura. El ajuste obtenido es muy bueno e independiente de la microestructura del acero, con un coeficiente de regresión $R^2=0.973$, y unos valores $\alpha_1=0.3417$ y $\alpha_2=10.366$. El pequeño valor de α_2 podría incluso despreciarse, y utilizar una expresión del tipo (2) con $\alpha=0.35$, valor similar a los obtenidos por otros autores que emplearon este mismo método de cálculo de la carga P_y [2,14].

Tabla 3. Coeficientes de variación para P_y

MATERIAL	$P_{y,t/10}$	$P_{y,t/100}$	$P_{y,ct}$	$P_{y,CEN}$	$P_{y,inf}$
DP 1	0.03	0.07	0.04	0.04	0.14
DP 2	0.03	0.04	0.03	0.03	0.21
DP 3	0.11	0.10	0.05	0.08	0.13
DP 4	0.01	0.05	0.03	0.04	0.06
S460	0.04	0.11	0.01	0.09	0.35

MATERIAL	$P_{y,t/10}$	$P_{y,t/100}$	$P_{y,ct}$	$P_{y,CEN}$	$P_{y,inf}$
S460ZAT	0.18	0.24	0.20	0.22	0.28
API X70	0.01	0.01	0.00	0.01	0.05
AR	0.13	0.19	0.08	0.12	0.25
AR_ZAT	0.07	0.12	0.06	0.09	0.17
Asturfer	0.02	0.03	0.03	0.03	0.11
CrMoV 1	0.03	0.05	0.04	0.04	0.29
CrMoV 2	0.03	0.07	0.09	0.05	0.25
CrMoV 3	0.07	0.11	0.09	0.09	0.27
CrMoV 4	0.04	0.06	0.09	0.09	0.30
AISI 304	0.05	0.08	0.07	0.06	0.04
D2205	0.15	0.21	0.24	0.23	0.30
MEDIA	0.06	0.10	0.07	0.08	0.20

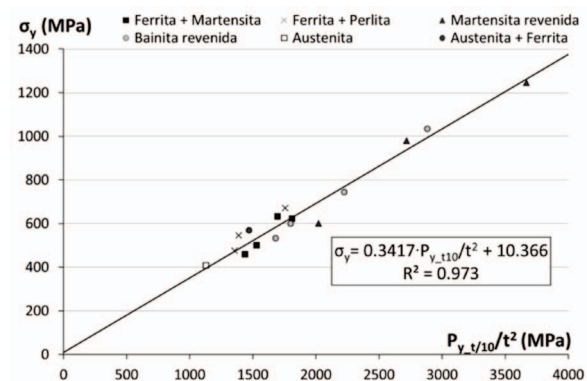


Figura 5. Límite elástico en función de $P_{y,t/10}/t^2$

La relación entre la resistencia a la tracción y P_m/t^2 se ha evaluado en la Figura 6. En dicha figura se han agrupado los materiales en dos grandes familias: los aceros con microestructura mayoritariamente ferrítica y/o bainítica y los aceros que presentan estructuras parcial (DPs) o completamente martensíticas.

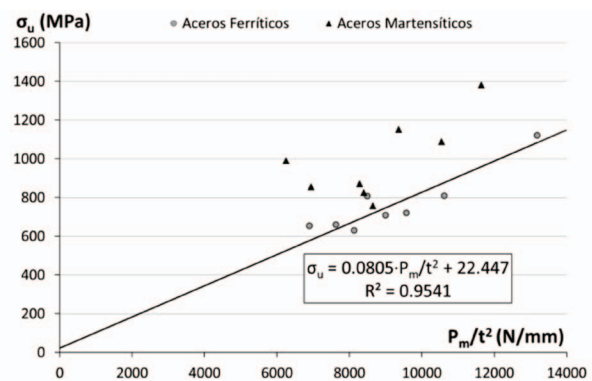


Figura 6. Relación entre σ_u y P_m/t^2

Si el ajuste entre σ_u y P_m/t^2 se realiza tomando únicamente el primer grupo de aceros (ferríticos y/o bainíticos) se obtiene un ajuste bastante bueno ($R^2=0.9541$), con valores $\beta_1=0.0805$ y $\beta_2=22.447$, valor este último que también podría despreciarse, utilizando una correlación del tipo (4) con $\beta=0.084$. Si este mismo ajuste se realiza entre σ_u y P_m/t , la regresión empeora significativamente ($R^2=0.765$), por lo que se comprueba que es más apropiado dividir la carga máxima del ensayo por el cuadrado del espesor.

Los aceros con estructura total y parcialmente martensítica, sin embargo, parecen presentar un comportamiento diferente y, en cualquier caso, una dispersión mucho más elevada. Una de las razones que podrían explicar dicha dispersión es que los valores de resistencia de los que se disponía para la mayor parte de los aceros de esta familia (aceros DP) eran valores de referencia, suministrados por el fabricante, lo que podría ser una fuente sustancial de error. Por esta razón no se ha realizado ningún tipo de ajuste con esta familia de aceros.

El valor de $\beta=0.084$ está dentro del rango obtenido por otros autores [2,8,10], si bien es cierto que dicho rango es bastante amplio, confirmando la posible dependencia de este coeficiente con el tipo de material

La Figura 7 muestra la relación entre el alargamiento a rotura y el desplazamiento en carga máxima del ensayo small punch dividido por el espesor, d_m/t . En este caso la correlación no es tan buena como en los casos anteriores ($R^2=0.749$), pero puede considerarse aceptable teniendo en cuenta que el alargamiento a rotura es un parámetro que depende de la geometría de la probeta utilizada, y que en ciertos casos no ha sido obtenido sobre probetas estándar. El ajuste presenta unos valores $\gamma_1=6.0408$ y $\gamma_2=0.9413$, y en caso de despreciar este último valor, la relación obtenida sería $A=\gamma \cdot d_m/t$, con $\gamma=6$, valor similar al presentado por otros investigadores para esta misma correlación [2].

Hemos de señalar que aunque la figura recoge también los resultados correspondientes a los aceros inoxidables (AISI304 y D2205), estos no se han tenido en cuenta en el ajuste al mostrar un comportamiento muy alejado del resto de los aceros analizados. La razón de estas diferencias en el comportamiento podría fundamentarse en la fuerte anisotropía que, presumiblemente,

presentan estos aceros, al haber sido fabricados y suministrados en forma de barra de 12 mm de diámetro. Así, mientras que el alargamiento a rotura se midió sobre probetas cuyo eje coincidía con el eje de las barras (dirección de laminación), las probetas SPT fueron extraídas transversalmente, lo que explicaría, al menos en parte, la menor capacidad de deformación del material en esta dirección.

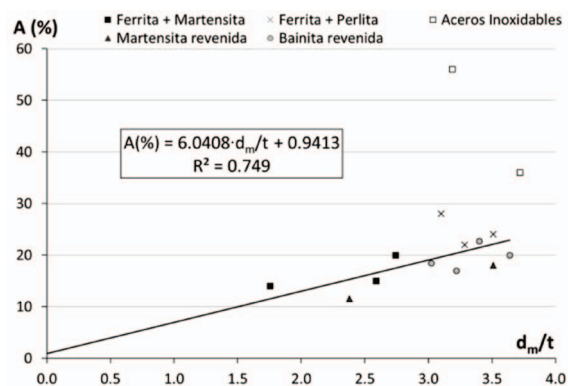


Figura 7. Alargamiento a rotura en función de d_m/t

4.2. Aplicación del ensayo SPT para la evaluación de la ZAT en un proceso de soldeo

La Figura 8 muestra las curvas SPT obtenidas de muestras representativas de las regiones denominadas 1, 2 y 3 en la Figura 4, mientras que la Tabla 4 recoge los valores de los parámetros medios característicos obtenidos en cada una de las regiones indicadas (entre paréntesis también se recoge la desviación estándar de cada parámetro) y la Tabla 5 presenta las propiedades mecánicas a tracción deducidas utilizando las expresiones validadas en el apartado anterior (se vuelven a mostrar entre paréntesis, las desviaciones típicas igualmente calculadas).

El primer punto que debe destacarse es la escasa variabilidad encontrada tanto en los parámetros característicos deducidos de los ensayos SPT como en las propiedades mecánicas fundamentales deducidas de los mismos. Por otro lado, los resultados que se muestran en la Tabla 5, muestran una disminución progresiva significativa del límite elástico y de la resistencia a la tracción y un aumento del alargamiento al avanzar en la ZAT hacia la línea de fusión, lo que sin duda se explica en virtud del sobrerrevenido, que es el efecto más importante que se observa en las

ZATs de los aceros templados y revenidos, efecto que es tanto más intenso cuanto más nos acercamos a la línea de fusión. Las probetas SPT ensayadas de la región ZAT 1, la más próxima a la línea de fusión, no llegaron a situarse en la región correspondiente a la austenización completa, donde cabría esperar el efecto contrario, es decir, un aumento del límite elástico y de la resistencia a la tracción junto con una drástica disminución del alargamiento, en virtud de la estructura mayoritariamente martensítica que se genera en el enfriamiento relativamente brusco subsiguiente en el soldeo.

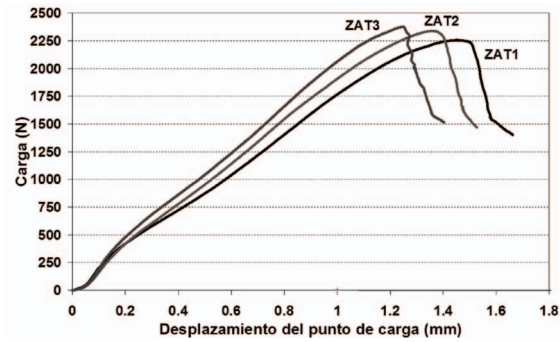


Figura 8. Curvas SPT correspondientes a las probetas representativas de la ZAT del acero 30CrMo5-2

Tabla 4. Parámetros característicos derivados de los ensayos SPT realizados sobre las distintas zonas de la ZAT

	$P_{y\ 1/10}/t^2$ (MPa)	P_m/t^2 (MPa)	d_m/t
ZAT 1	2098 (138)	10418 (239)	3.13 (0.11)
ZAT 2	2461 (52)	10530 (241)	2.94 (0.03)
ZAT 3	2667 (22)	10593 (125)	2.66 (0.05)

Tabla 5. Propiedades mecánicas de las distintas zonas de la ZAT obtenidas a partir de las relaciones ajustadas en el apartado anterior.

	s_y (MPa) $\sigma_y = 0.35(P_{y\ 1/10}/t^2)$	s_u (MPa) $\sigma_u = 0.084(P_m/t^2)$	A (%) $A = 6(d_m/t)$
ZAT 1	734 (48)	875 (20)	18.8 (0.7)
ZAT 2	861 (18)	884 (20)	17.6 (0.2)
ZAT 3	933 (8)	890 (10)	16.0 (0.3)

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta los resultados cosechados a lo largo de varios años de trabajo en los que se ha venido utilizando el ensayo SPT para la caracterización mecánica de distintas familias de aceros y de sus uniones soldadas, quedando patente, en primer lugar y como conclusión más relevante, la aplicabilidad de este ensayo, y su especial interés cuando se desea caracterizar una región muy pequeña o si el material del que se dispone es escaso.

Por su parte, parece quedar bien establecida la relación lineal existente entre el límite elástico de los aceros y el parámetro P_y/t^2 . Cuando P_y se calcula como punto de corte entre la curva y la paralela a la zona elástica inicial desplazada 1/10 veces el espesor de la probeta, el valor de la constante a es igual a 0.35.

La resistencia a la tracción de los aceros ferríticos y/o bainíticos puede ser estimada por medio de la carga máxima del ensayo small punch, mediante la relación $\sigma_u = 0.084 \cdot P_m/t^2$. Sin embargo, los aceros ferrito-martensíticos (DPs) no parecen ajustarse a esta relación.

En el caso de los aceros ferrítico-perlíticos, bainíticos y martensíticos, el alargamiento a tracción puede ser estimado con cierta precisión a través del desplazamiento en carga máxima del ensayo SPT, por medio de la relación $A(\%) = 6 \cdot d_m/t$.

Finalmente, se ha demostrado la posibilidad de utilizar el ensayo SPT para la caracterización mecánica de las distintas zonas que caracterizan la ZAT de una unión soldada en el caso de un acero templado y revenido, no solo cualitativamente sino incluso obteniendo valores fiables del límite elástico, resistencia a la tracción y alargamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto MAT2008-06879) y de la Consejería de Educación y Ciencia del Principado de Asturias (proyecto IB08-112C2).

REFERENCIAS

- [1] M.P. Manahan, A.S. Argon, O.K. Harling. *The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties*. J Nucl Mater 1981; 104: 1545-50.
- [2] C. Rodríguez, J. García, E. Cárdenas, F.J. Belzunce, C. Betegón. *Mechanical properties characterization of heat-affected zone using the small punch test*. Weld J 2009; 88: 188-92.
- [3] R. Lacalle, J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana. *Análisis de los aspectos fundamentales para la interpretación de los resultados del ensayo "small punch"*. Anales de Mecánica de Fractura 2007; 24-2: 515--20
- [4] D.J. Jaekel, D.W. MacDonald, S.M. Kurtz. *Characterization of PEEK biomaterials using the small punch test*. J Mech Behav Biomed 2011; 4-7: 1275-82.
- [5] P. Dymáček, K. Milička. *Creep small-punch testing and its numerical simulations*. Mat Sci Eng A-Struct 2009; 510-511: 444-9.
- [6] T. Linse, M. Kuna, J. Schunknetch, H.W. Viehrig. *Usage of the small-punch-test for the characterisation of reactor vessel steels in the brittle-ductile transition region*. Eng Fract Mech 2008; 75:3520-33.
- [7] T. Auger, I. Serre, G. Lorang, Z. Hamouche, D. Gorse, J.B. Vogt. *Role of oxidation on LME of T91 martensitic steel studied by small punch test*. J Nucl Mater 2008; 376: 336-40.
- [8] X. Mao, H. Takahashi. *Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for TEM disk small punch tests*. J Nucl Mater 1987; 150: 42-52.
- [9] R. Lacalle, J. García, J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana. *Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos*. Anales de Mecánica de Fractura 2009; 26-2: 501-6.
- [10] E. Fleury, J.S. Ha. *Small punch test to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I mechanical strenght*. Int J Pres Ves Pip 1998; 75: 699-706.
- [11] E. Cárdenas, F.J. Belzunce, C. Rodríguez, C. Betegón. *Determinación experimental de la tenacidad a la fractura a partir del ensayo miniatura de punzonado*. Anales de Mecánica de Fractura 2011; 28-2: 761-6.
- [12] K. Guan, L. Hua, Q. Wang, X. Zou, M. Song. *Assessment of toughness in long term service CrMo low alloy steel by fracture toughness and small punch test*. Nucl Eng Des 2011; 241: 1407-13.
- [13] CEN Workshop Agreement. *Small Punch Test Method for Metallic Materials*. European Committee for Standardization, 2006.
- [14] J. Autillo, M.A. Contreras, C. Betegón, C. Rodríguez y F.J. Belzunce. *Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento (small punch test) en la caracterización mecánica de aceros*. Anales de Mecánica de Fractura 2006; 23-1: 77-83.
- [15] M.A. Contreras, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, C. Betegón. *The use of small punch test to evaluate the ductile to brittle transition temperature of structural steels*. Fatigue and Fracture of eng. Materials and structures, 2007vol 31, pp 727-737.
- [16] C. Rodríguez, C. Betegón, F.J. Belzunce, J. García Cabezas, E. Cárdenas y M. Antuña. *Determinación de las propiedades mecánicas de las distintas zonas de la ZAT mediante el ensayo SPT*, Actas del I Congreso Internacional de Soldadura y Tecnologías de Unión, Madrid, 2008.